

Список использованных источников

1. Василенко И. Я., Осипов В. А., Рублевский В. П. Радиоактивный углерод // Природа. 1992. № 12. 513 с.
2. Бескорованный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А. Конструкционные материалы ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. 704 с.
3. Возможность утилизации отработавших графитовых втулок реакторов сибирского химического комбината путем сжигания. // Атомная энергия. 2003. Вып. 2. С. 130–138. А. В. Бушуев, Т. Б. Алеева, Е. В. Петрова, В. Н. Зубарев, А. Г. Николаев, В. Г. Семенов, Б.Г.
4. Проблемы утилизации реакторного графита оставленных промышленных уран-графитовых реакторов / А. А. Цыганов, Е. А. Хвостов, С. Г. Комаров, А. О. Котляревский, А. О. Павлюк, И. В. Шаманин, В. Н. Нестеров // Известия Томского политехнического университета. 2007. № 2. С. 94–98.
5. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. – М.: Металлургия, 1994. 352 с.
6. Моисеев Г. К., Вяткин Г. П., Барбин Н. М. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействия с участием ионных расплавов. – Челябинск: изд-во ЮУрГУ, 2002. 116 с.

УДК 669-5

В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, В. П. Цымбал

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СОВМЕСТНОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА- ОСЦИЛЛЯТОРА ПРОЦЕССА СЭР

Аннотация

В работе дана характеристика нового непрерывного металлургического процесса и агрегата типа СЭР, основанного на принципах синергетики. Были проведены модельные эксперименты и расчеты, направленные на конкретизацию применения этих принципов при решении задачи проектирования агрегата типа СЭР заданной производительности.

Рассмотрена методика расчета режимов струйно-эмульсионного металлургического процесса, предусматривающая определение массовых соотношений расходов шихтовых материалов, физико-химических параметров состояния процесса и значений конструктивных параметров агрегатов. Поставлена и решена задача оптимизации, в результате которой рассчитываются оптимальные расходы входных потоков при заданном критерии оптимизации и ограничениях.

Приведен пример расчета конструктивных и режимных параметров реактора-осциллятора процесса СЭР заданной производительности во взаимосвязи с другими агрега-

тами, образующими единый комплекс процесса. Показан механизм принятия решений на отдельных стадиях расчета.

Ключевые слова: струйно-эмульсионный реактор, принципы синергетики, входные потоки, конструктивные параметры

Abstract

Work gives the characteristic of new continuous metallurgical process and aggregate of the type SIR, based on the principles of synergetics. Were carried out simulation experiments and calculations, direction to the concrete definition of the application of these principles with the solution of the problem of designing the aggregate of the type " SIR " of the assigned productivity. Is examined the procedure of design conditions of jet- emulsion metallurgical process, which foresees the determination of the mass relationships of the expenditures of burden materials, the physical chemistry parameters of state of process and values of the design parameters of aggregates. The optimization problem, as a result by which the optimum consumption of input flows with the assigned optimization criterion and the limitations are calculated is set and solved. Is given an example of the calculation of the design and regime parameters of the reactor- oscillator of process SIR of the assigned productivity in the interrelation with other aggregates, which form the single complex of process. The mechanism of decision making at the separate stages of calculation is shown.

При создании нового непрерывного металлургического процесса и агрегата СЭР (струйно-эмульсионный реактор) поставлена и решена задача использования принципов синергетики [1; 2] и ряда физических эффектов [3] для увеличения скорости химических реакций, уменьшения энергоемкости и удельного объема агрегата. Благодаря диспергации шихты встречными струями процесс переведен в газофазную область, а использование свойства критического истечения двухфазной среды в сочетании с принципом круговой подчиненности позволило создать самоорганизующийся реактор-осциллятор. При этом величина неравновесного колебательного стационара (производительность процесса) находится из решения уравнений математической модели, связывающей основные конструктивные параметры агрегата и режимные параметры процесса.

Были проведены модельные эксперименты и расчеты, направленные на конкретизацию применения этих принципов при решении задачи проектирования агрегата типа СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) заданной производительности.

Методика расчета режимов струйно-эмульсионного металлургического процесса предусматривает выполнение нескольких этапов, основными из которых являются:

- определение массовых соотношений расходов шихтовых материалов для заданного набора компонентов входного потока и их состава и физико-химических параметров состояния процесса;
- расчет конструктивных параметров агрегатов, предусматривающий разделение агрегатов на ряд отдельных взаимосвязанных «зон» и рассмотрение зоны как элемента с однородными параметрами.

На первом этапе реализуется математическое описание взаимосвязи параметров потоков и процесса на основе законов сохранения массы и энергии. Блок расчета материального и теплового балансов предусматривает гибкий выбор входных и выходных параметров системы с учетом результатов термодинамического моделирования для выбранного типа процесса

и диапазона параметров. В результате решения задачи оптимизации рассчитываются оптимальные расходы входных потоков при заданном критерии оптимизации и ограничениях. В качестве критериев выбраны: суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции; себестоимость продукции; энергозатраты на единицу продукции и производительность агрегата. Постановка задачи оптимизации заключается в нахождении экстремума одного из критериев при выполнении ограничений на диапазоны изменения расходов компонентов входных потоков, ограничений на параметры выходных потоков, соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, соблюдение закона сохранения энергии, выполнение целевых условий по остальным критериям.

Процедуры по расчету материального, теплового балансов и решению задачи оптимизации реализованы средствами EXCEL путем осуществления связей и математических расчетов между элементами, совокупности таблиц и применения встроенного оптимизатора. Результаты являются исходными данными для реализации второго этапа.

В математической модели определения конструктивных параметров при выполнении газодинамических расчетов единицей математического описания является зона. Общее число фаз, присутствие которых возможно в зоне, – N фаз. Каждая f -я фаза состоит из Nf веществ, причем одно вещество не может присутствовать сразу в нескольких фазах.

Давление, Па, в реакторе создается газовой фазой и определяется выражением:

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\mu_i} \cdot \frac{RT^c}{V^c}, \quad (1)$$

где m_i – масса i -го компонента газовой фазы, кг;
 V^c – объем, занимаемый газовой фазой, м³;
 μ_i – молярная масса i -го компонента газовой фазы, кг/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;
 T^c – температура газовой фазы, К.

Скорость потока газа рассчитывается по формуле

Сен–Венана–Вентцеля [4]:

$$U = \sqrt{2c_p T \left(1 - \left(\frac{P'}{P_{\text{ex}}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right)}, \quad (2)$$

где c_p – эффективная теплоемкость потока, Дж/(кг·К);
 P_{ex} – давление в зоне выхода потока, Па;
 P' – давление на срезе выхода потока, Па;
 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты газа.

Давление на срезе выходного потока при дозвуковом истечении практически совпадает с противодавлением, т. е. давлением в зоне, в которую выходит поток, или с давлением окружающей среды. Однако, при достижении потоком местной скорости звука, оно составит величину:

$$P' = P_{\text{ex}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}}. \quad (3)$$

Таким образом, при использовании цилиндрических сопел скорость выходного потока газа, м/с, можно выразить следующим образом:

$$U = \sqrt{2c_p T \left(1 - \Delta P^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right)}, \quad (4)$$

где $\Delta P = \max \left(\frac{P}{P_{\text{ex}}}, \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \right)$, Па.

При расчете выходного потока газа необходимо учитывать плотность веществ на срезе выходного потока [4]:

$$\rho' = \rho_{\text{ex}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{(\gamma-1)}}, \quad (5)$$

где $M = \frac{U}{a}$ – число Маха.

С учетом высокого газосодержания смеси [4] газодинамические расчеты для выходного потока смеси можно проводить по уравнениям газовой динамики совершенного газа, имеющего эффективный показатель адиабаты $\bar{\gamma}$, который определяется из соотношения

$$\bar{\gamma} = \frac{c_v + \bar{R}}{c_v}, \quad (6)$$

где $\bar{R} = R_1 x^2$ – постоянная газовзвеси, Дж/(кг·К);

x_1 – массовая доля газовой фазы в потоке;

В зависимости от объемной доли газовой фазы возможен «жидкостный» или «газовый» режим истечения выходных потоков.

Использование соотношений (1)–(6) возможно как в прямом, так и в обратном направлении, например по параметрам газовой фазы и давлению в реакторе можно определять объем газовой фазы в зависимости от схемы расчета, принятой в модели.

Расчет скорости потока из жидких фаз осуществляется по формуле [4; 5]:

$$U = \sqrt{2(P_h - P_{\text{вых}})/\rho + 2gH}, \quad (7)$$

где P_h – гидростатическое давление зоны, расположенной выше, Па;

$P_{\text{вых}}$ – давление на выходе потока, Па;

ρ – плотность вещества в зоне, кг/м³;

H – высота зоны над выходным каналом, при условии, что зона полностью заполнена.

Расчет газодинамических режимов струйно-эмульсионного металлургического процесса во взаимосвязи с конструктивными параметрами агрегатов представляет сложную задачу, не имеющую единственного решения, так как существует целый ряд технологических и кон-

структивных ограничений, а также нет обратной связи для идентификации, поскольку речь идет о проектировании агрегата для заданной производительности. Поэтому расчет может быть итерационным, многоэтапным, с последовательным изучением режимов в отдельных элементах агрегатов. Принятая компоновка агрегатов приведена на рис. 1.

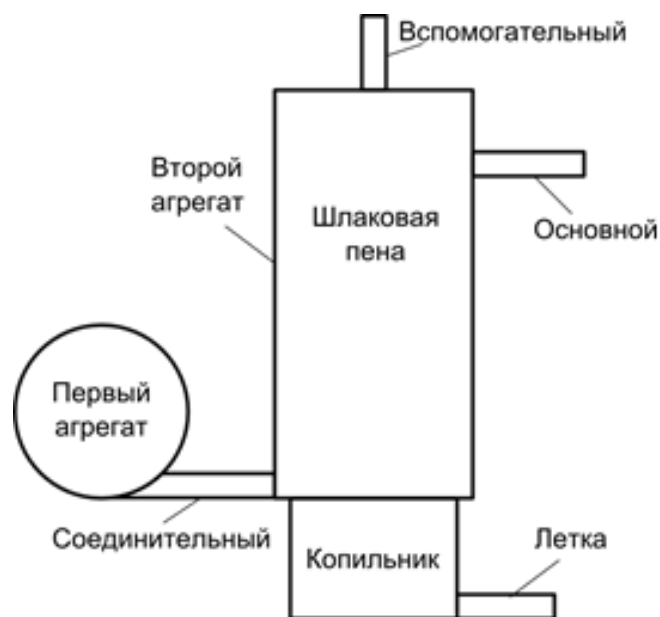


Рис. 1. Компоновочная схема агрегатов

Расчеты проводились по исходным данным, полученным для различных условий работы агрегатов при степени дожига СО 10, 20, 30, 40 и 50 %. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Расчет конструктивных параметров начинается с тех агрегатов и выходных каналов, которые имеют связь с атмосферой. Рассчитанные давления используются как исходные данные при расчете взаимосвязанных с ними агрегатов.

Таблица 1

Основные параметры расчета для разных степеней дожига СО

Параметр	Степень дожига СО, %				
	10	20	30	40	50
Содержание СО в первом агрегате, %	68,64	58,42	49,04	40,39	32,40
Содержание СО во втором агрегате, %	67,65	57,65	48,32	39,74	31,83
Массовый расход металла в соединительном канале, кг/с	0,185	0,184	0,184	0,184	0,184
Массовый расход шлака в соединительном канале, кг/с	1,766	1,752	1,743	1,737	1,732
Массовый расход газа в соединительном канале, кг/с	1,464	1,215	1,051	0,935	0,848
Массовый расход шлака в основном канале, кг/с	1,348	1,333	1,322	1,314	1,308
Массовый расход газа в канале «Основной» при отсутствии отвода через канал «Вспомогательный», кг/с	1,979	1,699	1,504	1,361	1,251

При расчете конструктивных параметров второго агрегата для определения диаметра основного канала и давления в зоне шлаковой пены были проведены расчеты истечения смеси газа и шлака через данный канал. Зависимость скорости истечения смеси от диаметра канала приведена на рис. 2. Для обеспечения необходимых режимов работы агрегатов требуется наличие некоторого давления в зоне шлаковой пены, однако в этом случае скорости истечения из основного канала достаточно высоки. Для уменьшения скоростей истечения, а также для обеспечения требуемого режима вытекания шлака часть газов (примерно 20 %) решено отводить через вспомогательный канал.

Расчет выпуска металла через летку осуществляется, исходя из производительности и необходимости пребывания металла в копильнике в течение одного часа. Расчет показал, что для обеспечения заданных условий требуется высота зоны 0,83 м при диаметре зоны 0,80 м. При этом требуемый для непрерывного выпуска диаметр канала 0,006 м не может быть реализован технически, поэтому принято решение о периодическом выпуске металла.

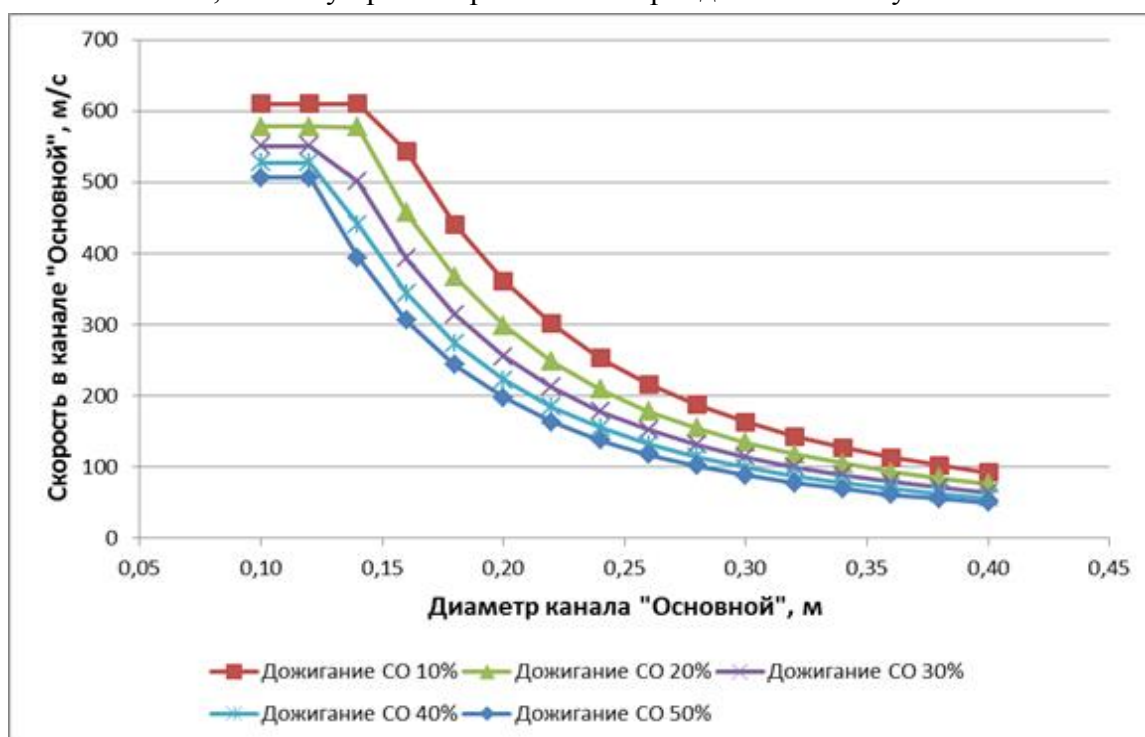


Рис. 2. Зависимость скорости истечения в основном канале от диаметра канала при разных степенях дожигания СО

На основе полученных результатов расчета выбраны следующие параметры:

- диаметр основного канала 0,25 м;
- доля газа во вспомогательном канале 20 %;
- диаметр вспомогательного канала 0,10 м;
- диаметр зоны шлаковой пены 1 м;
- диаметр зоны копильника 0,8 м;
- высота зоны шлаковой пены 4 м;
- высота зоны копильника 0,83 м.

Определение параметров первого агрегата выполнялось с учетом обеспечения необходимого времени пребывания веществ в нем для получения требуемой степени превращения

веществ. Время пребывания, наряду с давлением в агрегате и требуемым массовым расходом веществ, оказывает существенное влияние на геометрические размеры агрегата. Полученные зависимости диаметра первого агрегата от давления в реакторе для разных значений времени пребывания при заданном массовом расходе веществ показаны на рис. 3.

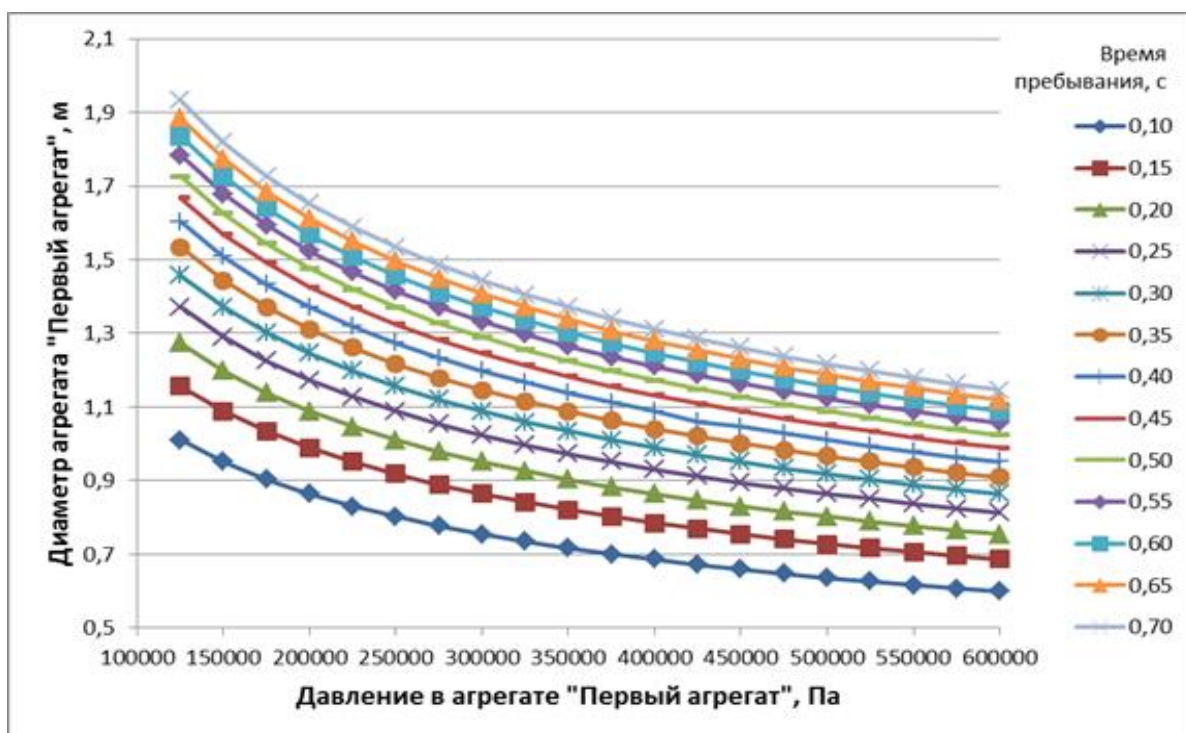


Рис. 3. Зависимость диаметра первого агрегата от давления в агрегате при разных значениях времени пребывания

Для обеспечения времени пребывания 0,35 с и давления в агрегате 3–4 атм. был выбран диаметр агрегата 1,1 м.

При заданных массовом расходе веществ в канале «Соединительный» и давлении в агрегате «Первый агрегат» значения скоростей истечения в канале и диаметра канала определяются однозначно. Зависимости скорости и диаметра канала от давления в агрегате приведены на рис. 4.

Для выбранного давления в агрегате диаметр соединительного канала будет составлять 0,092 м при скорости 486 м/с.

В соединительном канале скорость истечения достигает критической отметки. Значения критических скоростей для различных степеней дожигания СО и различных значениях объемного газосодержания приведены на рис. 5. Точками на рисунке отмечены значения, соответствующие режимам работы агрегатов при рассчитанных конструктивных параметрах.

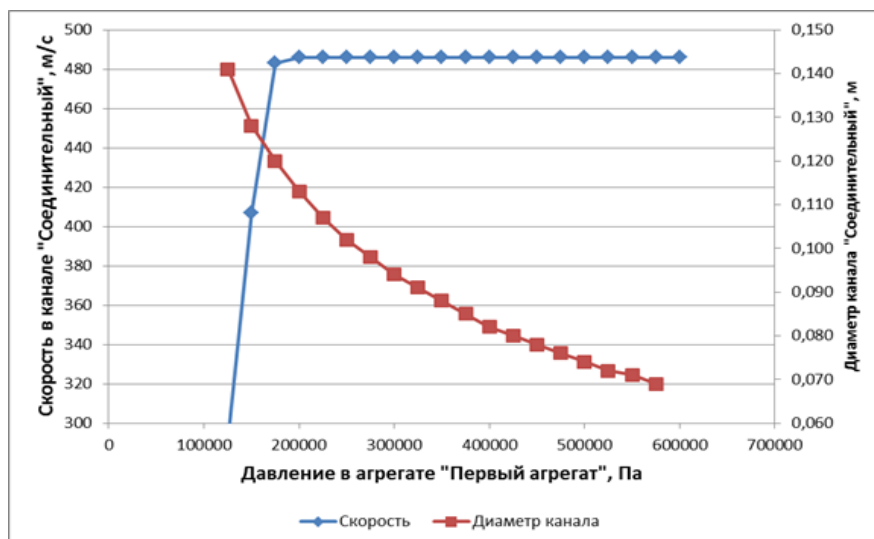


Рис. 4. Зависимость скорости в канале и диаметра канала «Соединительный» от давления в агрегате

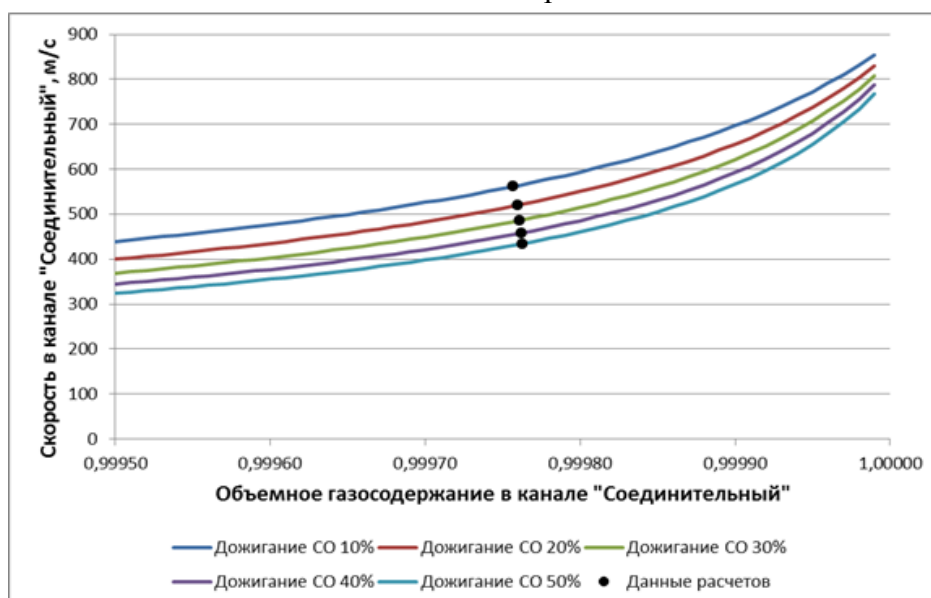


Рис. 5. Зависимость критической скорости от объемного газосодержания при разных степенях дожигания СО для условий соединительного канала

Список использованных источников

1. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Калашников С. Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х ч.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: уч. пособие / под редакцией В. П. Цымбала. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 264 с.
2. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. – 512 с.
3. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Волоновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х т. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 560 с.
5. Темцев Б. Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.